

Удосконалення обладнання для інтенсифікації процесу сушіння дисперсних харчових продуктів

С. М. Сабадаш, М. Ю. Савченко-Перерва, О. В. Радчук, Л. Г. Рожкова,
А. М. Загорулько

Одним з найбільш розповсюджених і досліджених процесів у харчовій промисловості є процес сушіння, він становить завершальну стадію технологічних схем і визначає якість готового продукту. Встановлено, що завдяки ефективному використанню об'єму сушарки та збільшенню поверхні фазового контакту інтенсифікувався процес сушіння та зменшилася собівартість висушеного продукту. Визначено, що збільшування відносної швидкості дисперсної і газової фази в свою чергу збільшувало рушійну силу процесу сушіння і зменшувало витрату теплоносія на сушіння. З'ясовано, що при застосуванні інертного носія збільшувалася відносна швидкість поверхні фазового контакту.

Проведено теоретичні та експериментальні дослідження, які дозволили одержати емпіричні співвідношення, необхідні для інженерного розрахунку конструктивних особливостей сушарки із псевдозрідженим шаром інертного носія для сушіння дисперсних харчових продуктів. Основні особливості установки для сушіння дисперсних харчових продуктів полягають в наступному. По-перше, у верхній частині камери був розміщений пристрій для уловлення продукту, який запобігав винесенню разом із частинками інертного носія. По-друге, використання фторопластової крихти дало змогу інтенсифікувати процес сушіння внаслідок збільшення поверхні тепломасообміну. По-третє, використання вентилятора і калорифера дозволяло отримати сухе гаряче повітря необхідної температури, запобігаючи потемнінню продукту.

Під час розробки сушильної установки було встановлено основні вимоги забезпечення рівномірного сушіння в усьому об'ємі сушильної камери при високих техніко-економічних показниках: мінімальних габаритах та мінімальних витратах матеріалів на побудову сушарки, мінімальних витратах теплоти та електроенергії на висушування одного кілограма сировини, простому обслуговуванні, зменшенні вартості ремонту обладнання, невисокі затрати на виробництво, простота і надійність експлуатації.

Під час порівняння розрахунків за показником енергоефективності встановлено, що енергоефективність розробленої моделі сушарки вища на 0,25 % у порівнянні з типовою моделлю сушарки

Ключові слова: сушіння, псевдозріджений шар, дисперсні харчові продукти, калорифер, технологічна схема, тепломасообмін

1. Вступ

Згідно джерела [1], на процеси, які пов'язані із сушінням, припадає 25 % національного споживання енергії промислово розвинених країн, а в харчовій і

переробній промисловості до 30 %. В роботі [2], зазначається що барабанні конвективні сушарки мають питомі енерговитрати 4000–9000 кДж/кг випареної води, при цьому велика частина втрат припадає на відпрацьований сушильний агент (до 40 %). У зв'язку з цим, питання раціонального використання енергії можна вирішити двома основними способами:

- розробка нових і удосконалення існуючих способів сушіння;
- розробка нових технологічних прийомів здійснення процесу зневоднення.

Вибір енергоефективного способу сушіння та економія енергоресурсів останнім часом набуває усе більшої актуальності. На рис. 1 наведено порівняння різних способів сушіння за їхніми енерговитратами [3].

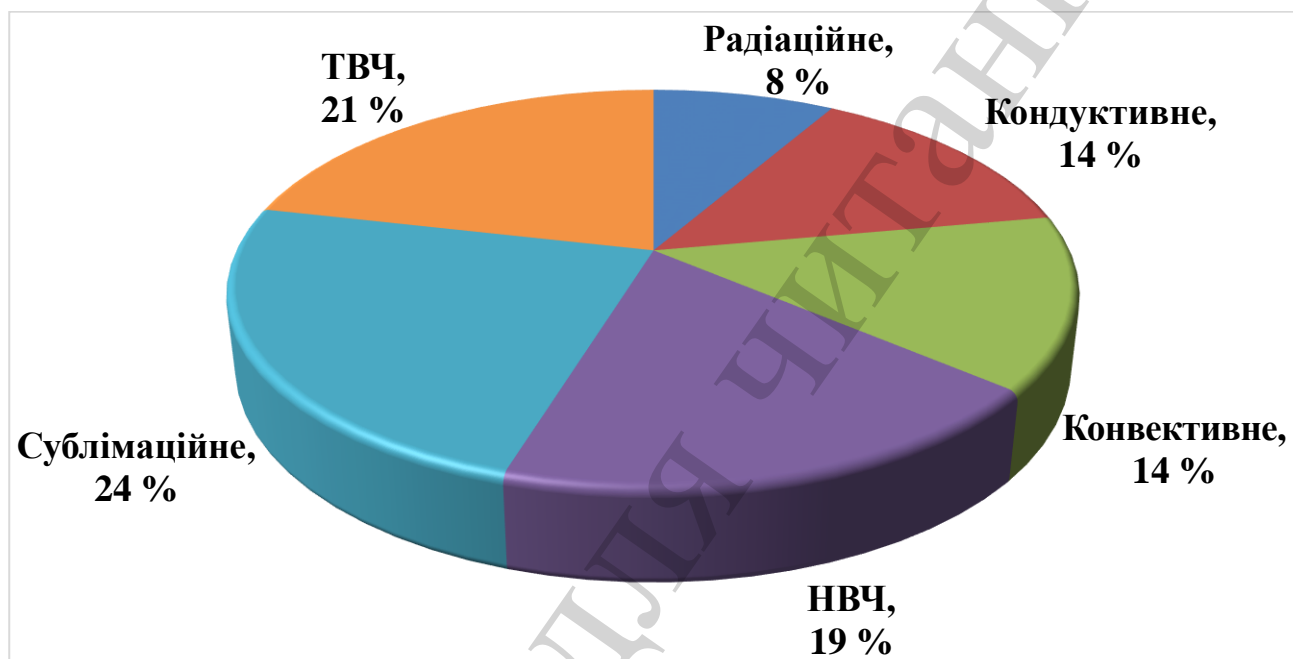


Рис. 1. Порівняння питомих енерговитрат за різними способами сушіння

Зважаючи на ці дані, питомі енерговитрати є ненайнижчими у конвективного сушіння, але цей спосіб має низку переваг, таких як:

- висока продуктивність;
- проста організація процесу;
- нескладність експлуатації та апаратурного оформлення.

Отже, актуальним є завдання розробки нових і модернізація існуючих способів сушіння. Саме тому розглядається сушіння в псевдозрідженому шарі інертного носія, який для сушіння вичавки ядра волоського горіху до цього не використовувався через складність перебігу процесу.

2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В роботі [4] наведені результати досліджень зневоднення дисперсних харчових продуктів у промисловому виробництві. Показано, що науковці вимушені шукати і застосовувати все більш сучасні і економічно доцільні способи сушіння. Питання пошуку та вибору сушильного енергозберігаючого устатку-

вання потребує додаткового дослідження. При дослідженні сушіння розглядаються процеси видалення вологи з харчового матеріалу, як результат одночасних процесів тепло- і масообміну [5].

За результатами досліджень встановлено, що більшість харчових продуктів має високий вміст вологи, що становить більше 80 %. Цей показник робить харчові продукти нестійкими до псування, що потребує додаткових наукових досліджень. Саме такий підхід використано в роботі [6], де в результаті зневоднення харчових продуктів з'являється можливість зберігати їх в стабільному і безпечному стані. Дослідження показали, що зниження активності вологи призвело до значного збільшення терміну зберігання висушених продуктів харчування. Також дослідження, які приведені в роботі [7] встановили дві основні умови покращення технології сушіння:

- приведення кінетики сушіння у балансову відповідність;
- збалансованість гідродинамічних і термодинамічних умов процесу сушіння до змін стану і властивостей висушеного матеріалу.

Ці дослідження дозволяють стверджувати, що час перебування матеріалу в сушильному апараті має бути не менше часу, необхідного для сушіння до заданої вологості. Також встановлено, що відповідність параметрів зовнішнього середовища, згідно другої умови, забезпечує механізм вологого перенесення і кінетичний процес сушіння. Це також виключає можливість псування продукту протягом сушіння. Крім цих умов, вибираючи спосіб сушіння, апаратне забезпечення процесу, слід керуватися такими принципами:

- низькою вартістю стадій процесу;
- безпечності сушіння;
- забезпечення технологічності процесу [8].

Ще одним із ефективних шляхів зменшення вартості висушеного продукту є інтенсифікація процесу сушіння шляхом ефективного використання сушильної камери. Інтенсифікацію процесу сушіння в роботі [9], пов'язують із збільшенням поверхні фазового контакту. Збільшуючи відносну швидкість дисперсної і газової фаз, збільшують рушійну силу процесу сушіння і зменшують витрати теплоносія на сушіння. Також одним із розповсюджених способів сушіння дисперсних матеріалів – є сушіння у псевдозрідженому шарі інертного носія, яке широко використовують в різних галузях промисловості. Такий метод дозволяє значно прискорити процес висушування харчових продуктів [10], але досягнення оптимальних енерговитрат потребує додаткових досліджень в напрямі встановлення співвідношень конструктивних елементів сушарок із псевдозрідженим шаром.

Закономірності сушіння вичавок ядра волоського горіху в псевдозрідженому шарі визначаються одночасним перебігом декількох фізичних явищ перенесення тепла і маси: теплообміном між поверхнею матеріалу і навколишнім середовищем, випаровуванням вологи з поверхні матеріалу в навколишнє середовище (масовіддача), переміщенням теплоти всередині матеріалу (теплоперенесення), переміщенням вологи всередині матеріалу (масоперенесення).

Все це дозволяє стверджувати, що на теперішній час не доведена максимальна ефективність висушування продукції при мінімальних затратах енергії. Це

стало підґрунтям подальшого пошуку визначення оптимальних показників та виду сушильного устаткування. Таким чином, дана робота присвячена розробці емпіричних співвідношень конструктивних особливостей сушарок із псевдозрідженим шаром інертного носія та встановлення показників ефективності.

3. Мета і завдання дослідження

Метою дослідження є удосконалення сушарок із псевдозрідженим шаром інертного носія на основі встановлення співвідношень їх конструктивних особливостей.

Зазначена мета зумовила необхідність вирішення таких завдань:

- розробити експериментальну установку процесу сушіння дисперсних харчових продуктів;
- дослідити залежності між продуктивністю сушарки і температурою матеріалу в процесі його зневоднення;
- дослідити енергоефективність запропонованої моделі сушарки з псевдозрідженим шаром інертного носія.

4. Матеріали і методи дослідження обладнання для інтенсифікації процесу сушіння

Сушіння дисперсних харчових продуктів у сушарці із псевдозрідженим шаром інертного носія є складним технологічним і фізичним процесом, зумовленим одночасним стиранням і подрібненням частинок висушеного продукту [11].

Матеріал, який використовувався при дослідженні – вичавки ядра волоського горіху. Для раціонального використання методів транспортування і зберігання вичавок ядра волоського горіху було досліджено дисперсний склад продукту методом мікроскопічного визначення.

В процесі дослідження використовувалися аналітичні, теоретичні та експериментальні методи дослідження процесу сушіння, статистичний метод планування експерименту. Також результати вимірювання технологічних показників процесу сушіння в сушарці із псевдозрідженим шаром інертного носія піддавалися методу комп'ютерної обробки.

Для дослідження процесу сушіння вичавок ядра волоського горіху у псевдозрідженному шарі інертного носія та вирішення поставлених завдань була спроектована й виготовлена експериментальна установка.

5. Експериментальна установка процесу сушіння дисперсних харчових продуктів

На основі результатів лабораторних досліджень була спроектована дослідно-промислова установка для сушіння дисперсних харчових продуктів. Процес сушіння в ній відбувається таким чином: підсушування розпиленого матеріалу у прямотечії з газоподібним теплоносієм і кінцеве підсушування на поверхні інертних матеріалів, які перебувають у стані псевдозрідження.

Проведені теоретичні та експериментальні дослідження дозволили одержати емпіричні співвідношення, необхідні для інженерного розрахунку конструктивних особливостей сушарки із псевдозрідженим шаром інертного носія

для сушіння пастоподібних дисперсних продуктів. Особливості установки для сушіння є такі:

- у верхній частині камери розміщений пристрій для уловлення продукту, який запобігає винесенню разом із частинками інертного носія;
- використання фторопластової крихти дає змогу інтенсифікувати процес сушіння в наслідок збільшення поверхні тепломасообміну;
- використання вентилятора і калорифера дозволяє отримати сухе гаряче повітря необхідної температури, запобігаючи потемнінню продукту.

Під час розробки сушильної установки основними вимогами були: невисокі затрати на виробництво, простота і надійність експлуатації, невисокі енерговитрати на процес сушіння. Вихідні дані для розробки і створення сушильної установки наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Вихідні дані для розробки і створення сушильної установки

1	Сировина	Вичавки ядра волоського горіху
2	Продуктивність сушарки за вологим матеріалом, кг/с	0,45
3	Завантаження сировини і розвантаження продукту	Автоматичне
4	Контроль за режимом сушіння	Автоматичний
5	Керування калорифером	Автоматичне, електронне
6	Кількість обслуговуючого персоналу, чол.	3–5

Відповідно до вихідних даних, була вибрана сушильна установка безперервної дії з електрокалорифером.

Спосіб підведення теплоти до продукту – конвективний, теплоносій – повітря.

На рис. 2 зображена розроблена конструкція сушильної камери.

Схему розробленої установки для сушіння подано на рис. 3.

Установка для сушіння складається із циліндроконічної камери 1, газорозподільної решітки 2, яка розміщена в нижній частині камери.

Вхідний патрубок 3 з'єднаний з електрокалорифером 4 для нагрівання повітря, яке подається в камеру 1 нагнітальним вентилятором 5. У верхній частині камери 1 розташований патрубок для входу продукту в камеру 6 із дозатором. Вихідний патрубок 7 з'єднаний із АЗЗП 8. У нижній частині, де збирається сухий продукт, по осі апарата розташований конічний затвор. Затвор притискається до нижнього отвору АЗЗП 8 за допомогою гвинта з пружиною.

Установка для сушіння харчових продуктів працює таким чином: до сушильної камери 1 через розподільну решітку 2 подається калорифером 4 та вентилятором 5 нагріте повітря, яке приводить інертний носій у стан псевдозрідження, в якому частинки носія інтенсивно рухаються одна відносно іншої. На частинки носія через патрубок надходить пастоподібний продукт, який обволікає фторопластові крихти тонкою плівкою. Під дією нагрітого повітря плівка висихає і подрібнюється на дрібнодисперсні частинки продукту. Далі відпра-

цьоване повітря з продуктом надходить у завихрювач, звідки одержана маса потрапляє в місткість для сухого продукту.

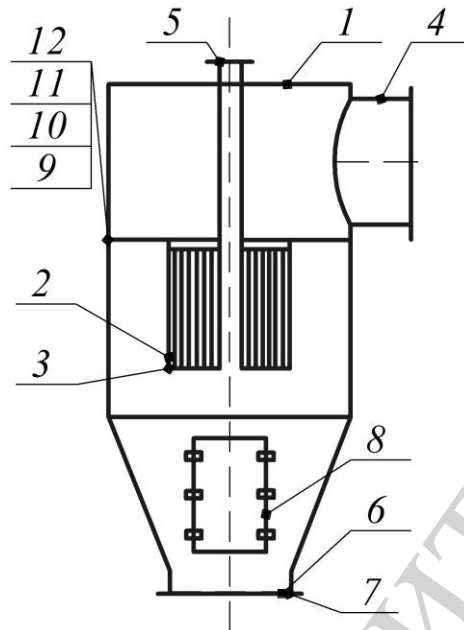


Рис. 2. Переріз циліндроконічної камери сушарки із псевдозрідженим шаром інертного носія: 1 – сушильна камера; 2 – уловлювач продукту; 3 – отвори; 4 – вихідний патрубок; 5 – входний патрубок; 6 – газорозподільна решітка; 7 – вхід теплоносія; 8 – люк; 9 – болти; 10 – гайки; 11 – шайба; 12 – прокладка

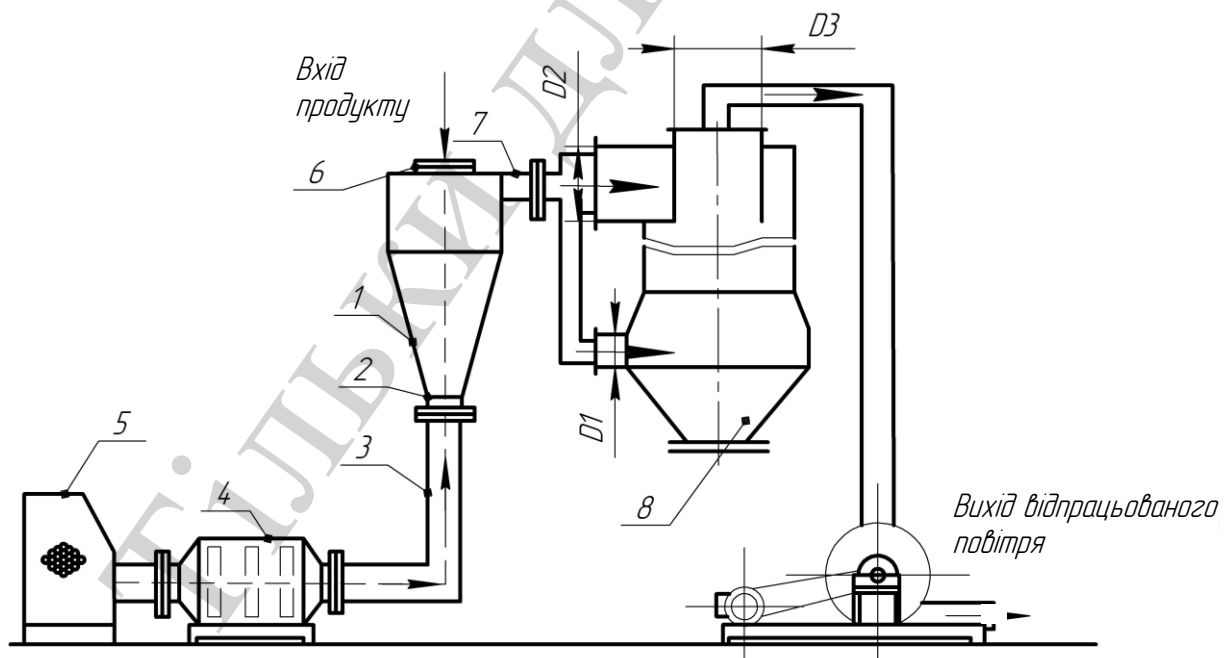


Рис. 3. Схема експериментальної установки: 1 – сушильна камера; 2 – газорозподільна решітка; 3 – входний патрубок; 4 – калорифер; 5 – вентилятор; 6 – патрубок для входу продукту в камеру; 7 – патрубок виходу продукту; 8 – апарат із зустрічними закрученими потоками (АЗЗП)

Запропоноване технічне рішення було перевірене на експериментальному стенді з типовою конструкцією сушарки продуктивністю 55–60 м³/год при нагріванні повітря до температури на вході 110...150 °С і на виході 52...60 °С. Об'єм сушильної камери становив 1,7 л, її діаметр 0,12 м, висота корпусу 0,14 м. Розподільча решітка зроблена у вигляді сітки 0,001×0,001 м. Діаметр решітки 0,05 м.

АЗЗП для уловлення продукту має діаметр виходу первинного потоку $D_1=0,45$ м, діаметр вихрового завихрювача $D_2=0,9$ м, діаметр пилового отвору $D_3=0,6$ м. Запилений газ може потрапляти до корпусу одночасно по центральному приосьовому вводу та тангенційному зовнішньому вході газового потоку. Вторинний потік, який подається через завихрювач з діаметром отвору D_1 , рухається з верхньої частини корпусу вниз. В процесі руху він поступово змішується з приосьовим потоком, який рухається знизу догори через завихрювач з діаметром отвору D_2 [12].

Таким чином, використання установки для сушіння пастоподібних матеріалів, за рахунок охолодження продукту в бункері, дозволяє одержати більш якісний продукт, який можна використовувати в сільському господарстві та виробництві харчових продуктів.

Виходячи з обраних раціональних режимів, за емпіричними і стандартними рівняннями теплового і масового балансу були розраховані основні технічні характеристики установки для сушіння продукту у псевдозрідженому шарі інертного носія. Основні характеристики установки наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Основні характеристики установки для сушіння вичавки ядра волоського горіху

Характеристика	Значення характеристики
Продуктивність сушарки за вологим матеріалом, кг/год	1980
Продуктивність за випареною вологою, кг/год	1000
Витрати теплоти, Вт	$35 \cdot 10^4$
Витрати повітря, кг повітря/кг вологи	32
Витрата теплоти на випаровування 1 кг вологи, кДж	3070

Порівнявши дані, щодо питомих витрат теплоти на випаровування 1 кг вологи за різних способів сушіння, наведених у табл. 3, констатуємо, в разі сушіння дисперсного продукту розробленим способом, питомі витрати теплоти будуть меншими ніж у інших сушарок. Слід відзначити, що в розробленій сушарці відбувається повний процес сушіння продукту, тобто власне сушіння та уловлення продукту в апараті із зустрічними закрученими потоками.

Таблиця 3

Витрати теплоти на випаровування 1 кг вологи

Спосіб сушіння продукту	Витрати теплоти на випаровування 1 кг вологи, кДж
Барабанна сушарка	4976

Камерна сушарка	7952
Конвеєрна сушарка	5281
Розроблений спосіб	4080

Таким чином, розроблено енергоефективну установку для сушіння дисперсних продуктів у псевдозрідженому шарі інертного носія з продуктивністю 1980 кг/год за вологим матеріалом та витратами теплоти 4080 кДж.

6. Результати дослідження залежності продуктивності сушарки від температури матеріалу під час його зневоднення

Установлення залежності між продуктивністю сушарки і температурою матеріалу під час його зневоднення є одним з актуальних завдань дослідження процесу сушіння харчових продуктів у псевдозрідженому шарі інертного носія. На рис. 4 відзначено, що питома продуктивність сушарки за випареною вологою прямо пропорційна температурі сушильного агента, тобто з збільшенням температури повітря на вході в камеру сушарки збільшується і продуктивність сушарки, що досягає свого максимального значення за продуктивності $\Delta W = 150$ кг вологи/м³ год. Таким чином, встановлено, що оптимальною температурою для сушіння дисперсних харчових продуктів у псевдозрідженому шарі інертного носія є 130 °С. За цієї температури досягається максимальна продуктивність сушарки за випареною вологою. Якщо збільшити температуру сушильного агента, то це призведе до погіршення якості продукту та підвищення енерговитрат. Отримана крива свідчить про те, що температура є найбільш значущим чинником, який впливає на продуктивність сушарки.

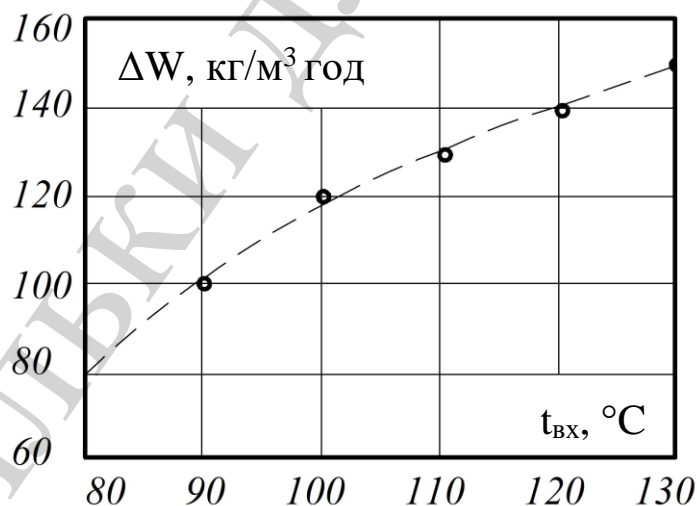


Рис. 4. Залежність продуктивності сушарки (ΔW) від температури повітря на вході в камеру ($t_{вх}$) при $\omega_{п}=45\%$, $\omega_{к}=10\%$

На рис. 5 показано взаємозв'язок між питоною продуктивністю сушарки та початковою вологістю матеріалу ($\omega_{п}$) за різних температур. Ці дані характеризують ступінь зниження продуктивності сушарки залежно від початкової масової частки .вологи в продукті. Чим менша масова .частка води в продук-

ті, тим менше продуктивність сушарки для випарювання цієї води. Похибки експерименту складають 2 %.

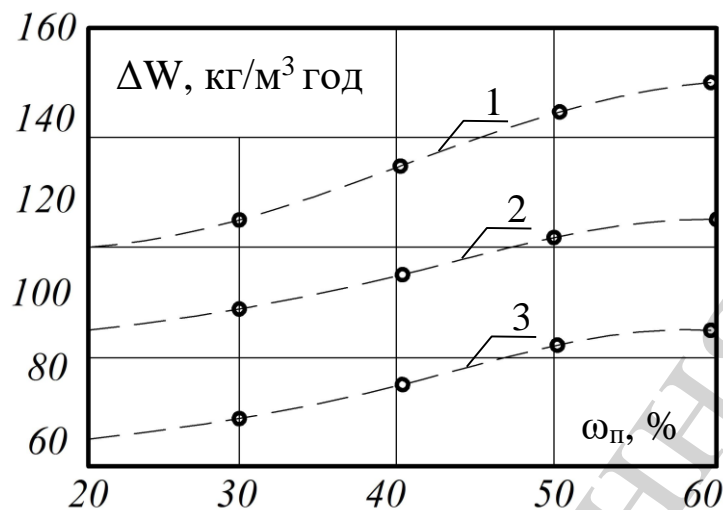


Рис. 5. Залежність продуктивності сушарки (ΔW) від початкової вологості продукту при $\omega_{п}=10\%$; 1 – 90 °C; 2 – 110 °C; 3 – 130 °C

Практично важлива узагальнююча залежність:

$$\Delta W = f(\omega_{п}, \omega_{к}, t_{вх}), \quad (1)$$

досліджувалася з використанням статистичних методів планування експерименту [13].

Після проведення розрахунків встановлено, що найбільше впливає на продуктивність сушарки за випареною водою початкова вологість матеріалу найбільше впливає на продуктивність сушарки за випареною водою початкова температура та вологість матеріалу, також потужний вплив чинить температура на вході в камеру і кінцева вологість матеріалу.

Температурний режим сушіння, який забезпечує отримання продукту з кінцевою вологістю до 10 %, є таким:

температура повітря становить:

- на вході в камеру – 100...130 °C;
- на виході з камери – 40...60 °C.

7. Дослідження енергоефективності процесу сушіння дисперсних продуктів у сушарці із псевдозрідженим шаром інертного носія

Питання енергоефективності процесу сушіння є вкрай актуальним [14]. Провівши аналітичні дослідження процесу сушіння дисперсних матеріалів були розроблені шляхи підвищення ефективності сушарок у псевдозрідженому шарі інертного носія (рис. 6).

Для порівняння сушарок у псевдозрідженому шарі інертного носія за енергоефективністю було взято типову конструкцію сушарки ГТЗ-01 для сушіння дисперсних матеріалів і запропоновану модель сушарки у псевдозрідженому

шарі інертного носія. Загальний вигляд сушарок показано на рис. 7, 8, технічні характеристики сушарок наведено в табл. 4, 5.

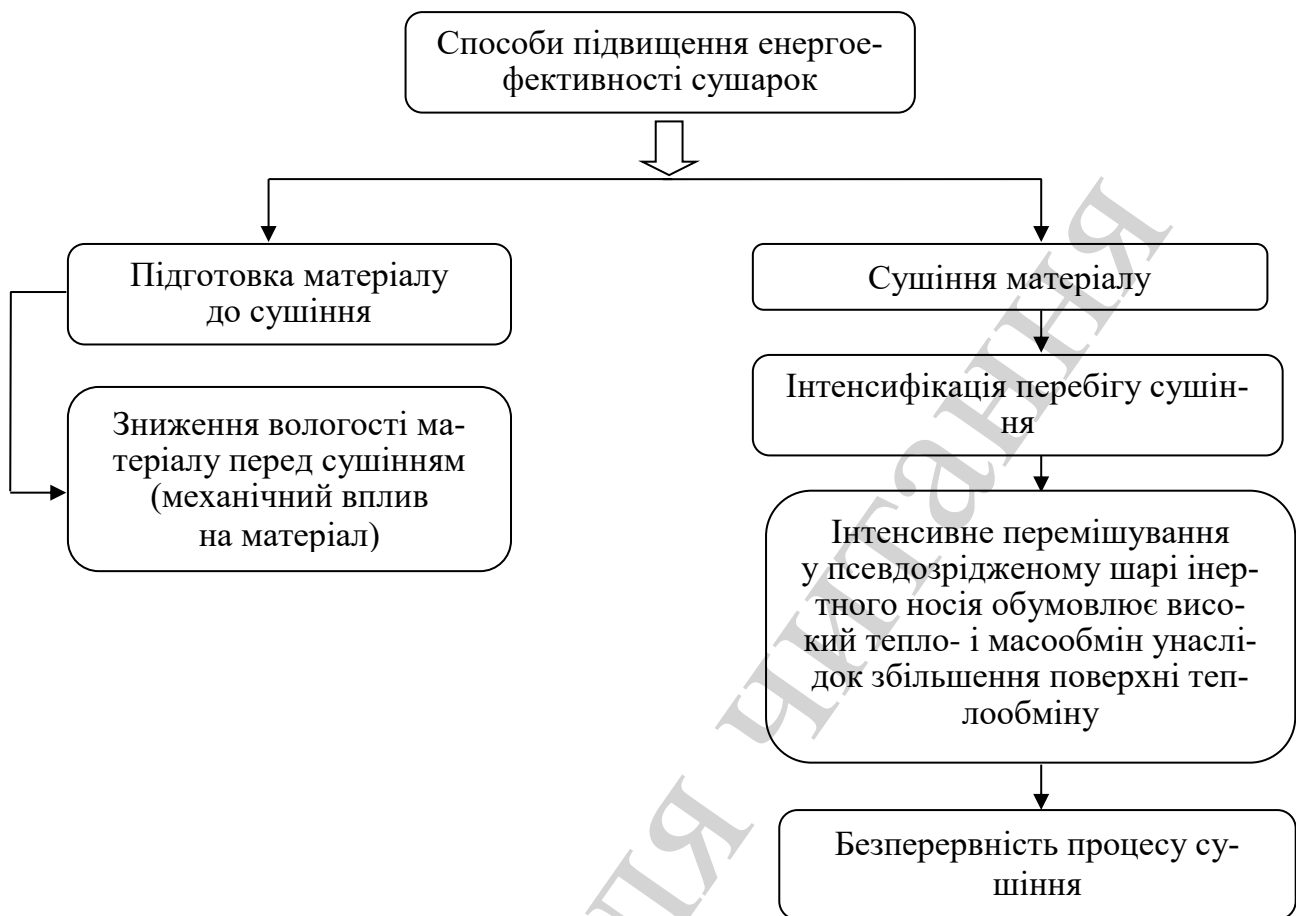


Рис. 6. Схема способів підвищення енергоефективності сушарок у псевдозрідженому шарі інертного носія

Для порівняння сушарок за енергоефективністю використання енергії для видалення вологи, було взято формулу розроблену вченими [15]. Для оцінки ефективності використання енергії під час сушіння слід врахувати продуктивність сушарки за випаровуваною вологою, віднесеною до питомих витрат енергії.

$$E_{\phi} = \frac{\Delta m / \Delta \tau}{Q / \Delta m}, \quad (2)$$

де E_{ϕ} – показник енергоефективності, (кг/год)/(Дж/кг); m – маса вологи, вилучена внаслідок сушіння, кг; τ – тривалість сушіння, год; Q – повні витрати енергії на процес, Дж.

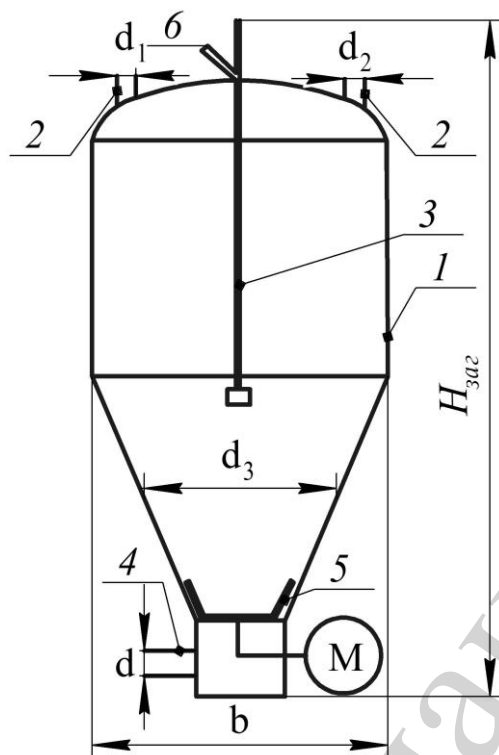


Рис. 7. Сушарка у псевдозрідженому шарі інертного носія ГТЗ-01: 1 – сушильна камера; 2 – патрубки для виходу продукту; 3 – патрубок для потрапляння продукту в камеру; 4 – патрубок для входу теплоносія; 5 – мішалка; 6 – вхід повітря

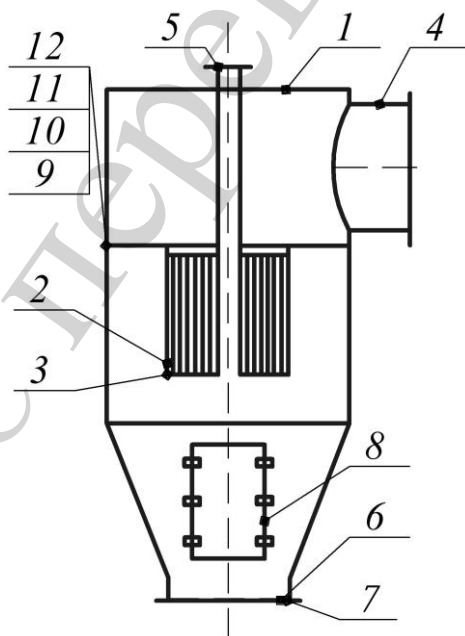


Рис. 8. Розроблена модель сушарки у псевдозрідженому шарі інертного носія: 1 – сушильна камера; 2 – уловлювач продукту; 3 – отвори; 4 – вихідний патрубок; 5 – вхідний патрубок; 6 – газорозподільна решітка; 7 – вхід теплоносія; 8 – люк; 9 – болти; 10 – гайки; 11 – шайба; 12 прокладка

Технічні характеристики сушарки ГТЗ-01

Продуктивність сушарки за випареною вологою, кг/год	1000
Масова частка води в продукті, %:	
початкова	45–75
кінцева	5–8
Температура теплоносія, °C:	
на вході	252
на виході	125

Таблиця 5

Технічні характеристики розробленої моделі сушарки

Продуктивність сушарки за випареною вологою, кг/год	1000
Масова частка води в продукті, %:	
початкова	40–60
кінцева	8–10
Температура теплоносія, °C:	
на вході	130
на виході	50

Результати розрахунків наведено на рис. 9

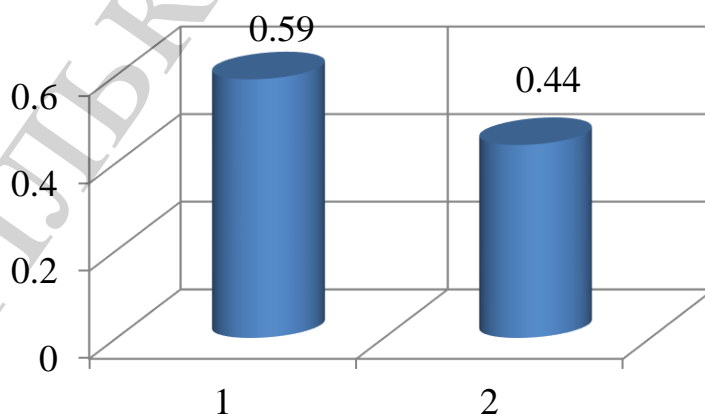


Рис. 9. Показник енергоефективності сушарок: 1 – розроблена сушарка у псевдозрідженому шарі інертного носія; 2 – типова модель сушарки ГТЗ-01

Показник енергоефективності за умов сушіння в сушарках псевдозрідженого шару розраховувався за рівнянням (2). Після порівняння показників енергоефективності очевидно, що енергоефективність розробленої моделі сушарки значно вища, ніж у типової моделі сушарки ГТЗ-01. Тому розроблена установка може бути рекомендована для сушіння дисперсних харчових продуктів.

8. Обговорення результатів досліджень по удосконаленню установки для сушіння дисперсних харчових продуктів

Для досягнення поставленої задачі із удосконалення обладнання для інтенсифікації процесу сушіння дисперсних харчових продуктів в лабораторії Сумського національного аграрного університету (Україна) була спроектована та виготовлена модель сушарки. В ній процес сушіння вичавок ядра волоського горіху відбувався таким чином: підсушування розпилювального матеріалу у прямотечії з газоподібним теплоносієм і кінцеве підсушування на поверхні інертних матеріалів, які перебували у стані псевдозрідження. Особливостями розробленої сушарки є: у верхній частині камери розміщений пристрій для уловлення продукту, який запобігає винесенню разом із висušеним продуктом інертні частинки; використання фторопластової крихти дає змогу інтенсифікувати процес сушіння в наслідок збільшення поверхні тепломасообміну; використання вентилятора і калорифера дозволяє отримати сухе гаряче повітря необхідної температури, запобігаючи потемнінню продукту.

Установлення залежності між продуктивністю сушарки і температурою матеріалу під час його зневоднення є одним з актуальних завдань дослідження сушіння дисперсних продуктів у псевдозрідженому шарі інертного носія. На рис. 4 відзначено, що питома продуктивність сушарки за випареною вологою прямо пропорційна температурі сушильного агенту, тобто із збільшенням температури повітря на вході в камеру сушарки збільшується і продуктивність сушарки, що досягає свого максимального значення за продуктивності $\Delta W = 150$ кг вологи/м³ год. Таким чином, встановлено, що оптимальною температурою для сушіння вичавок ядра волоського горіху у псевдозрідженому шарі інертного носія є температура 130 °С. За цієї температури досягається максимальна продуктивність сушарки за випареною вологою. Якщо збільшити температуру сушильного агенту, то це призведе до погіршення якості продукту та підвищення енерговитрат. Отримана крива свідчить про те, що температура є найбільш значущим чинником, який впливає на продуктивність сушарки.

На рис. 5 показано взаємозв'язок між питомою продуктивністю сушарки та початковою вологістю матеріалу (ω_n) за різних температур. Ці дані характеризують ступінь зниження продуктивності сушарки залежно від початкової масової частки вологи в продукті. Чим менша масова частка вологи в продукті, тим менше продуктивність сушарки для випарювання цієї вологи.

Показник енергоефективності за умов сушіння вичавок ядра волоського горіху в сушарках псевдозрідженого шару розраховувався за рівнянням (2). Співставлення показників енергоефективності сушарок показало, що енергоефективність розробленої моделі сушарки значно вища, ніж у типової моделі

ГТЗ-01. Тому розроблена установка може бути рекомендована для сушіння вичавок ядра волоського горіху.

Таким чином, розроблена технологічна лінія сушіння дисперсних харчових продуктів має певні переваги:

– запропоновано оригінальний спосіб сушіння у псевдозрідженому шарі інертного носія, який базується на кінематичних закономірностях, забезпечуючи стовідсоткове контактування теплоносія і висушеного продукту з інертними тілами, що дозволяє інтенсифікувати процес, досягнути необхідної продуктивності та якості сушіння;

– використання вентилятора і калорифера дозволяє отримати сухе гаряче повітря потрібної температури, запобігаючи потемніння продукту.

Зазначені вище переваги дозволяють зробити висновок про те, що на сьогодні ця технологія є найбільш перспективною, вона дозволяє отримати якісний продукт із низькими капітальними й експлуатаційними витратами.

9. Висновки

1. Удосконалено сушильне обладнання для інтенсифікації процесу сушіння з дослідженням гідродинаміки та процесу тепломасообміну, яке складається з удосконаленого обладнання для сушіння вичавки ядра волоського горіху та АЗЗП. Удосконалена модель сушильного обладнання відрізняється від типової конструкції наявним пристроєм для уловлення продукту, одночасно підсушуючи його, збільшуючи при цьому продуктивність технологічного процесу.

2. Експериментально встановлено, що оптимальна температура для сушіння вичавки ядра волоського горіху у псевдозрідженому шарі інертного носія на вході в сушарку становить $t=130\text{ }^{\circ}\text{C}$, на виході $t=55\text{ }^{\circ}\text{C}$, початковий вологовміст продукту до сушіння $\omega_{\text{поч}}=45\text{ \%}$, після сушіння $\omega_{\text{кін}}=10\text{ \%}$. При цих параметрах досягається максимальна продуктивність сушарки за випареною вологою $\Delta W=150\text{ кг/м}^3\text{ год}$.

3. Провівши розрахунки за енергоефективністю було встановлено, що у розробленій сушарці показник енергоефективності складає значно вищий, ніж у типовій моделі, і складає 0,59 проти 0,44 відповідно. Таким чином установка для сушіння може бути використана для сушіння харчових продуктів.

Література

1. Kudra, T. (2004). Energy Aspects in Drying. Drying Technology, 22 (5), 917–932. doi: <https://doi.org/10.1081/drt-120038572>
2. Данилов, И., Леончик, Б. (1986). Экономия энергии при тепловой сушке. М.: Энергоатомиздат, 136.
3. Безбах, И. В., Бахмутян, Н. В. (2006). Исследование процесса сушки плодов и ягод во взвешенном слое. Наук. праці ОНАХТ, 2 (28), 60–64.
4. Zagorulko, A., Zahorulko, A., Kasabova, K., Chervonyi, V., Omelchenko, O., Sabadash, S. et. al. (2018). Universal multifunctional device for heat and mass exchange processes during organic raw material processing. Eastern-

European Journal of Enterprise Technologies, 6 (1 (96)), 47–54. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.148443>

5. Izli, N., Izli, G., Taskin, O. (2017). Influence of different drying techniques on drying parameters of mango. Food Science and Technology, 37 (4), 604–612. doi: <https://doi.org/10.1590/1678-457x.28316>

6. Yi, X.-K., Wu, W.-F., Zhang, Y.-Q., Li, J.-X., Luo, H.-P. (2012). Thin-Layer Drying Characteristics and Modeling of Chinese Jujubes. Mathematical Problems in Engineering, 2012, 1–18. doi: <https://doi.org/10.1155/2012/386214>

7. Ahmad-Qasem, M. H., Santacatalina, J. V., Barrajon-Catalan, E., Micol, V., Cárcel, J. A., García-Pérez, J. V. (2014). Influence of Drying on the Retention of Olive Leaf Polyphenols Infused into Dried Apple. Food and Bioprocess Technology, 8 (1), 120–133. doi: <https://doi.org/10.1007/s11947-014-1387-6>

8. Burdo, O. G., Burdo, A. K., Sirotuk, I. V., Pour, D. R. (2017). Technologies of Selective Energy Supply at Evaporation of Food Solutes. Problemele energeticii regionale, 1 (33), 100–109. URL: http://journal.ie.asm.md/assets/files/12_01_33_2017.pdf

9. Yehorov, V., Golubkov, P., Putnikov, D., Honhalo, V., Habuiev, K. (2019). System for analyzing the qualitative characteristics of grain mixes in real time mode. Food Science and Technology, 12 (4). doi: <https://doi.org/10.15673/fst.v12i4.1222>

10. Sabadash, S., Kazakov, D., Yakuba, A. (2015). Development of the post-alcohol stillage drying process on inert bodies and output of criterion dependence. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 1 (6 (73)), 65–70. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.38056>

11. Peltola, J. (2009). Dynamics in a Circulating Fluidized Bed: Experimental and Numerical Study. Tampere University of Technology, 111.

12. Savchenko-Pererva, M., Yakuba, A. (2015). Improving the efficiency of the apparatus with counter swirling flows for the food industry. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 3 (10 (75)), 43–48. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.43785>

13. Спиридонов, А. А. (1981). Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов. М.: Машиностроение, 184.

14. Park, J.-H. (2016). Analysis of drying stress and energy consumption during kiln drying of center-bored round timber. Seoul National University.

15. Потапов, В. О., Гриценко, О. Ю. (2014). Аналіз енергоефективності процесу сушіння в тепломасообмінному модулі за умови підвищеного тиску. Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі, 1, 133–141.